

# RECHENTECHNISCHE ZEITANALYSE EINES NETZWERKPLANS MIT VERÄNDERLICHEN BEZIEHUNGEN

L. BANK

Lehrstuhl für Bauausführung, TU Budapest

(Eingegangen am 2. Februar 1976)

Vorgelegt von Prof. Dr. Z. VAJDA

## 1. Vergleich der Organisationsmodelle aus der Sicht der rechentechnischen Verarbeitung

### 1.1 In der Bauorganisation angewandte Ausdrucksweisen

Das in der organisatorischen Planung angewandte Symbolensystem wurde in den letzten Jahrzehnten durch Elemente aus der Theorie der Graphen erweitert. Unter den wichtigsten Darstellungsweisen sind zu nennen:

- das GANT-Diagramm (Balkendiagramm)
- der Zeitplan in Form eines Zyklogramms (mit zwei Dimensionen, z.B. Zeit und Raum)
- die Netzwerkplanung mit Graphenelementen und
- die Entscheidungsbäume, ebenfalls unter Anwendung von Graphen.

Mit jeder Darstellungsform wird das Ziel verfolgt, durch bildhafte Erscheinung und graphische Konstruktion das Lösen von Organisationsproblemen und die Information der Benutzer zu erleichtern (z. B. durch die Bedeutung der Lage der einander zugeordneten Linienbalken bzw. der sich schneidenden, parallelen oder divergierenden Linien im Zyklogramm usw.).

Mit Hilfe dieser Modelle lassen sich jedoch selbst in miteinander kombinierter oder kodierter Form nicht alle Organisationsinformationen direkt ausdrücken (wie z. B. Informationen über Kraftquellen, etwaigen Unterbrechungen wegen ungünstigen Wetters usw.).

Die Wahl der Ausdrucksform wird durch mehrere Rücksichten beeinflusst:

- Umfang der Bauaufgabe oder die Zahl der Objekte, von denen u.a. die Gesamtzahl der Tätigkeiten abhängig sein kann,
- die Absicht, den räumlichen Charakter zum Ausdruck zu bringen, besonders in Falle von linearen oder umfangreichen Bauvorhaben um das Fortschreiten zu veranschaulichen,
- die Kompliziertheit der technischen und organisatorischen Zusammenhänge usw.

## 1.2 Meßzahl des Kompliziertheitsgrades

Als Meßzahl der Kompliziertheit nehmen wir einstweilen als grobe Näherung die Zahl der Beziehungen je Tätigkeit an, die als Kompliziertheitsgrad bezeichnet werden soll.

Bei einer eingehenderen Untersuchung empfiehlt es sich auch die Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Schließlich kann die Anzahl der ES-Relationen und der Relationen der kritischen Näherung (CR) ausführlichere Informationen liefern. Die Kompliziertheit der Organisationsaufgaben kann technologische, konstruktive, organisatorische und Betriebsorganisationsgründe haben. Vielfältige technologische Zusammenhänge bringen eine hohe Zahl der technischen Beziehungen mit sich, beim Verfolgen des Umstellens von Organisationen oder Kraftquellen entstehen im Modell Organisationsbeziehungen. Nach praktischen Erfahrungen fallen auf Betriebsebene auf jede Tätigkeit mindestens je eine technische und eine organisatorische Beziehung, d. h. zwei Beziehungen. Dieser Fall darf als Grundfall des Kompliziertheitsgrades gelten. (Selbstverständlich kann auch eine einzige Abhängigkeit — z. B. entweder eine technische oder eine organisatorische — vorkommen, dadurch wird jedoch die Lösung nicht kompliziert, da das System einen einzigen Eingang bzw. Ausgang hat.)

Der Kompliziertheitsgrad ermöglicht einen verhältnismäßigen Vergleich von Organisationsaufgaben:

$$\text{Kompliziertheitsziffer} = \frac{\Sigma \text{ Anzahl der Beziehungen}}{\Sigma \text{ Anzahl der Tätigkeiten}}$$

## 1.3 Das Balkendiagramm und der zyklographische Zeitplan als Modelle mit einer einzigen Beziehung

Beim Betrachten eines *klassischen* Balkendiagramms oder eines zyklographischen Zeitplans fällt es auf, daß der untersuchten Tätigkeit nur eine Beziehung zugeordnet werden kann, u.zw. die auf die vorangehende Tätigkeit bezogene relative Lage der untersuchten Tätigkeit oder die damit vollkommen gleichwertige, auf den Start bezogene absolute zeitliche Lage.

In diesem Sinne kann also der Bauzeitplan in Form eines Balkendiagramms oder Zyklogramms als ein Modell mit einer einzigen Beziehung bezeichnet werden: diese können also bei der Planung von Organisationsaufgaben mit dem Komplexitätsgrad 1 vorteilhaft angewandt werden.

Durch diese Modelle werden die einfache und doppelte Abhängigkeit sehr anschaulich, aber statisch dargestellt.

In der Praxis kommt mehr als eine Abhängigkeitsbeziehung zustande, die im Modell auszudrücken sind. In der klassischen Darstellung bleiben

jedoch diese Beziehungen verborgen, man kann auf sie u.U. schließen oder diese in den schriftlichen Unterlagen — z. B. in der Baubeschreibung — angeben.

#### 1.4 *Genauere und bewertete Formulierung der technischen und organisatorischen Bedingungen unter Anwendung der Netzplantechnik*

Werden für eine Tätigkeit mehrere technische oder organisatorische Beziehungen angesetzt, lösen sich die traditionellen Modelle aus der »festen« zeitlichen Lage los, daher kann von einem maßgebenden, einem »kritischen« Weg, von der frühesten und spätesten Lage der Tätigkeiten, von Reservezeit gesprochen werden. Die Anpassungsfähigkeit des geschriebenen oder gezeichneten Graphen an die tatsächliche Bauausführung wird durch die veränderbaren Tätigkeitszeiten, durch die in Abhängigkeit von den Tätigkeitszeiten erhaltene Folgezeitintervall und durch die zweckmäßig veränderbaren Beziehungen erhöht.

Es haben sich mehrere in Inhalt und Form abweichende Varianten der Netzwerktechnik herausgebildet, die in anderen Beiträgen dieses Bandes eingehend behandelt werden. Aus der Sicht der rechentechnischen Verarbeitung möchten wir hier das wichtigste Kriterium, die Offenheit der Entscheidungen unterstreichen.

Die bauorganisatorische Planung enthält eine große Anzahl logischer Entscheidungen bzw. Befehle, die der Rechner nur bei genauer wertmäßiger Formulierung ausführen kann. (Beim manuellen Rechnen müssen diese in der Regel nicht formuliert werden, weil sie »selbstverständlich« bzw. »offenbar« sind.)

## 2. Hauptkennwerte des Zeitanalysenprogramms des Netzwerks\*

Unter Anwendung der minimalen und der maximalen Folgebedingungen machen vier Relationen (*SS*, *ES*, *EE*, *CR*) das Netz für eine verhältnismäßig genaue Beschreibung der Entscheidungen geeignet. Diese Offenheit der Entscheidungen bringt jedoch die Festlegung einer größeren Anzahl von Entscheidungen mit sich, als es früher möglich war, gleichzeitig nimmt auch der Rechenaufwand zu. Über einer gewissen Größenordnung kann eine Rückkopplung des Problems auftreten, die rechentechnische Bearbeitung kann infolge des Umfangs der Aufgabe erforderlich werden. Das Rechenprogramm für die Zeitanalyse des Netzwerks kann — wie jedes Organisationsprogramm — unter Berücksichtigung je anderer Bedingungen und Grenzen auf vielerlei Art aufgestellt werden.

\* An der Ausarbeitung des Programms nahm neben dem Verfasser *András Kápolnai* teil.

Die Aufstellung des Algorithmus wird durch die zur Verfügung stehende EDV-Anlage, besonders durch die Speicherkapazität derselben, durch den Typ des Datenträgers, durch die Ausschreibemöglichkeiten beeinflusst.

Im vorliegenden Falle wurde das Rechenprogramm der Bauzeitplanung auf einer Rechenanlage ORDA 1204 in der Maschinensprache ALGOL aufgesetzt, da die Maschinensoftware kein Bibliothekprogramm für Netzplanung mit Tätigkeitsknoten enthielt.

Die Kenndaten des Rechenprogramms sind wie folgt:

a) In der Variante des Programms, wo alle das Netz betreffenden Informationen im Hilfsspeicher (in Magnettrommelspeichern) gespeichert werden, beträgt die maximale Zahl der Tätigkeiten etwa 2000, die Zahl aller Beziehungen etwa 10 000. (Im Prinzip hat es kein Hindernis, das Programm für eine größere Datenmenge umzuorganisieren.)

b) Die Tätigkeitszahlen bzw. Tätigkeitskennmarken können in rein numerischer oder alphanumerischer Form vorkommen. Dadurch können sie je Schlüsselwort Träger zusätzlicher Informationen in bezug auf die Tätigkeit sein.

c) Die Grunddaten, d.h. die Tätigkeiten mit der dazugehörenden Information können in einer beliebigen Reihenfolge in den Rechner eingegeben werden.

d) Die Informationen über die Tätigkeiten und Beziehungen, den der Art der Abhängigkeit entsprechenden Kode und die Beziehungsgröße entsprechenden Kode und die Beziehungsgröße inbegriffen, werden in Vektoren gespeichert.

e) Überlappungs-, parallele und Reihenbeziehungen der Tätigkeiten können in beliebiger Anzahl angesetzt werden, die Zahl der vorangehenden Tätigkeiten ist also nicht eingeschränkt. Durch das Programm werden die minimale und die maximale Folgebedingungen gedeutet.

f) Terminberechnung und Zeitanalyse erfolgen anhand des bekannten Algorithmus des »kritischen Weges«. Durch das Maschinenprogramm werden zuerst der früheste, dann der späteste Anfangstermin der Tätigkeit bestimmt und schließlich werden die vollen, freien, bedingten, unabhängigen Reservezeiten sowie der Fertigstellungstermin berechnet.

### 3. Bestreben das Rechenprogramm zu vereinfachen

#### 3.1 Einfluß der Speicherkapazität:

»Der Algorithmus ist die Beschreibung und Regulierung der Lösung einer Aufgabe in endlicher Zahl von Schritten, das Aufstellen von Regeln für diese Lösung. Es handelt sich jedoch nicht nur darum, die üblichen (dem Rechenschieber, der Tischrechnermaschine, dem manuellen Rechnen ange-

paßten) Verfahren klar und eindeutig zu beschreiben, sondern vielmehr darum, eine EDT-Methoden zum Lösen der Aufgabe anzuwenden«. [1]

Der Rechner ODRA 1204 macht die höchste Abpassung hinsichtlich der Speicherkapazität erforderlich. Das wichtigste war, mit Raum und Zeit richtig zu wirtschaften, die EDV zeitlich und räumlich zu organisieren.

Bei einem Matrixalgorithmus hätte der operative Speicher mit 16 K ( $1\text{ K} = 1024 = 2^{10}$ ) Speicherzelleninhalt nur die Abarbeitung von Netzwerken mit 80 bis 90 Tätigkeiten ermöglicht, weil auch die Programme selbst Raum einnehmen.

Bei einer matrixartigen Beschreibung der Netzbeziehungen würde dabei ein bedeutender Teil der Zellen des operativen Speichers unausgefüllt bleiben.

Daher wurden die Grunddaten in Form von besonderen Vektoren für die Tätigkeiten und für die vorangehenden Tätigkeiten gespeichert, wodurch sich die bekannte Zeitanalyse in Matrixform der Netzwerktechnik erübrigte.

### 3.2 Das Programm der Transformation auf eine einzige Relation

Der Algorithmus für die rechentechnische Zeitanalyse von Netzplänen hat bei einem ununterbrechbaren Tätigkeitstyp zwei mögliche Lösungen:

I. Einbeziehen in die Berechnung der Tätigkeitsdauer und aller Terminarten — d.h. frühester Anfang und frühestes Ende, spätester Anfang und spätestes Ende;

II. als Ergebnis der Transformation auf die Relationen Start-Start oder End-End, Rechnen nur mit den Anfängen oder nur mit den Enden, unabhängig von der Tätigkeitszeit.

Die II. Variante ist im Falle von Netzplänen automatisch gegeben, die lediglich *SS*- und *EE*-Relationen enthalten. Von diesem Standpunkt aus lohnt es sich, die nur *SS*-Relationen anwendende MPM-Methode (Metra Potential Method) oder die nur *EE*-Relationen anwendende HMN-Methode (Hamburger Methode der Netzplantechnik) als klassische Grundfälle zu untersuchen.

Im Falle von *SS*-Relation werden nur die Anfangstermine, im Falle von *EE*-Relationen nur die Endtermine der Tätigkeiten berechnet, da sich später durch Hinzurechnen oder Abrechnen der Tätigkeitszeit das Gegenpaar einfach ermitteln läßt.

Eine Art Abhängigkeitsverhältnis innerhalb des Netzwerks gestattet sowohl beim maschinellen als beim manuellen Rechnen eine Vereinfachung, die Einsparung der Stellen der Termin-Gegenpaare.

Für die Bauorganisation war es trotzdem nicht zweckdienlich, die ursprüngliche MPM- oder HMN-Technik zu übernehmen, vielmehr empfiehlt es sich alle vier Relationen zu behalten und die Transformation auf eine Relationsart der Rechenanlage zu überlassen.

Das inhaltliche, logische Ziel des doppelten Abhängigkeitsverhältnisses und die Offenheit der Entscheidung können auch sonst nicht den Rücksichten des maschinellen bzw. manuellen Rechnens untergeordnet werden.

Was das rechentechnische Verfahren anbelangt, hat die Transformation auf SS- oder EE-Relationen kein prinzipielles Hindernis. (Da sich in Ungarn

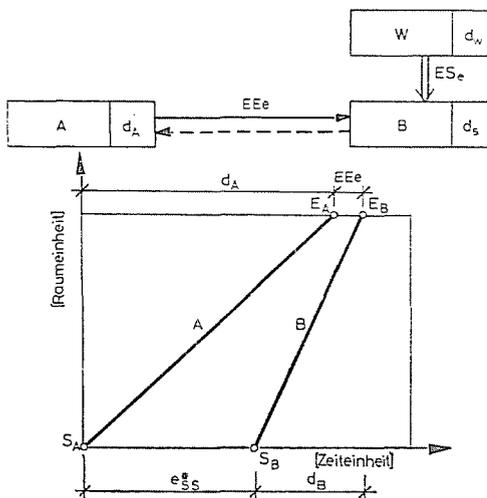


Abb. 1. Transformation: EE SS Relation

die Anwendung der MPM-Methode mehr durchgesetzt hat, wählten wir als Grundlage der Transformation die Start-Start-Relation.)

Bei der Transformation auf die Start-Start-Relation werden alle Abhängigkeiten auf die Lage zwischen den Anfängen der Tätigkeiten bezogen.

Beispielsweise ist die Umrechnung von dem EE-Abhängigkeitsverhältnis auf das SS-Abhängigkeitsverhältnis wie folgt:

In Abb. 1 ist die Tätigkeit B von der Tätigkeit A abhängig und der Tätigkeit B geht die maßgebende Tätigkeit W voran. Der nach rückwärts weisende, gestrichelte Pfeil symbolisiert die maximale Folgebedingung. Im Netzwerk und im Zyklusgramm-Zeitplan sind die Tätigkeitszeiten durch  $d_A$  und  $d_B$  und die Folgezeiten durch  $e$  bezeichnet, je nach dem, auf welche Relation sich das Folgezeitintervall bezieht. Durch den Index wird auch der Relationstyp angegeben (z. B. bedeutet  $e_{EE}$  das Folgezeitintervall  $e$  bei der End-End-Relation).  $S$  (Start) und  $E$  (End) bezeichnen die Anfangs- und Endtermine, wobei durch den Index die Tätigkeit gekennzeichnet wird (z. B.  $S_A$  und  $E_A$ ).

$e_{SS}^*$  bedeutet nach unserer Interpretation das auf die Start-Start-Relation transformierte Zeitintervall.

Nach dieser Bezeichnung und Interpretation gelten:

$$S_B = S_A + e_{ss}^* = S_A + (d_A + e_{EE} - d_B)$$

$$e_{ss}^* = d_A + e_{EE} - d_B.$$

Unter Anwendung der Bezeichnungen in Abb. 1 wird in Abb. 2 in einem Flußschaubild die Transformation auf Start-Start-Relation im Falle von ununterbrechbaren Tätigkeiten und mehreren Abhängigkeitsverhältnissen gezeigt. Das Folgezeitintervall  $e$  kann in Abhängigkeit von der Tätigkeitszeit  $d$  auch automatisch angenommen werden. Ist von der Beziehung  $CR$  die  $SS$ -Relation maßgebend, so läßt sich das Folgezeitintervall  $e$  aus der vorangehenden Tätigkeitszeit, ist von der Beziehung  $CR$  die  $EE$ -Relation maßgebend, dann aus der Zeit der nächsten Tätigkeit berechnen, entweder in Prozenten oder mit Hilfe der Abschnittszahl.

Die bisher beschriebenen Vereinfachungen lassen sich meistens nur bei der Zeitanalyse von ununterbrechbaren Tätigkeiten anwenden.

Ein komplizierterer Algorithmus und größere Speicherkapazität sind im Falle eines Netzwerks mit unterbrechbaren Tätigkeiten erforderlich, wo eventuell auch die kritische Näherung je Zeiteinheit geprüft werden muß.

### 3.3 Organisation der Eingabedaten

Die Beschreibung durch ein Netzwerk läßt sich auch als eine »Sprache« bezeichnen, die eine sehr einfache Beziehung zur Rechenanlage ermöglicht. Es ist auch leicht vorstellbar, daß ohne den Graphen zu zeichnen, das Netzwerk sozusagen im Text formuliert wird.

Diese verbale Beschreibung wurde bei dem von uns aufgesetzten Datenblatt angewandt, der aus zwei Hauptteilen, der Kopfzeile und den die Tätigkeiten betreffenden Informationen besteht.

Die Kopfzeile enthält

- unter 1, 2 und 3 die das Netz betreffenden Benennungen;
- unter 4 die Kennungsziffer des Modells;
- unter 5 die Gesamtzahl der Tätigkeiten (ohne Start);
- unter 6 die Gesamtzahl der Beziehungen (als anhaltsweise Daten);
- unter 7 den Kode der Zeiteinheit (Tag, Woche und Monat).

Die Teile ständiger Länge der sich auf die aktuelle Tätigkeit beziehenden, informativen Datengruppe sind:

- die Kennungsgröße der aktuellen Tätigkeit;
- die Benennung; und
- die Zeitdauer.

Die veränderlichen Teile dieser Datengruppe sind:

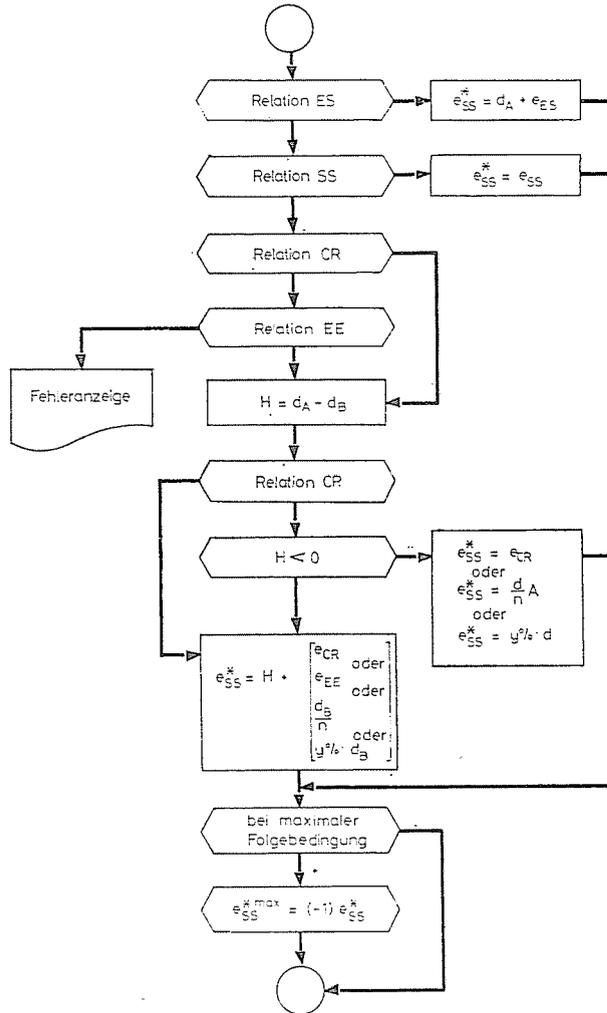


Abb. 2. Arbeitsschema der Transformation auf SS-Relation

- die Kennungsgröße der vorangehenden Tätigkeit;
- die Beziehung zwischen der vorangehenden und der aktuellen Tätigkeit; kodiert:  $ES = 1$ ,  $S = 2$ ;  $CR = 3$ ;  $EE = 4$ ; und
- die Menge der vorangehenden Tätigkeit, d.h. der ganzzahlige Zeitparameter mit  $\pm$  Vorzeichen.

Die Anzahl der vorangehenden Tätigkeiten ist beliebig. Daraus folgt, daß sich die Dreizahl, bestehend aus der Anzahl der vorangehenden Tätigkeiten, dem Kode der Abhängigkeit und dem Abhängigkeitszeitintervall, mehrfach wiederholen kann.

### 3.4 Die Form der Ausgabe

Das beschriebene Rechenprogramm kann das Ergebnis der Zeitanalyse in zwei Formen drucken:

- in tabellarischer Form und
- in Form eines GANT-Diagramms.

In diesem Rahmen läßt sich auch die Reihenfolge wählen, in der die Tätigkeiten gedruckt werden. Zweck und Gesichtspunkte beim Ordnen können verschieden sein, daher werden diese Gesichtspunkte dem Rechner als Druckbefehl am Steuerpult mit Hilfe von »Schlüsseln« mitgeteilt.

Mögliche Reihenfolgen sind:

- nach der Kennungszahl der Tätigkeiten;
- nach der Länge der Reservezeiten;
- nach dem frühesten Anfangstermin der Tätigkeiten usw.

Die *Tafel der Tätigkeiten* enthält zum Teil die Eingaben (Anzahl, Benennung und Dauer der Tätigkeiten) sowie die Zeitpunkte des frühesten und spätesten Anfangs bzw. Endes *der Reihenfolge der wachsenden Zahl der Tätigkeiten*. Die Tätigkeiten auf dem kritischen Weg sind (durch einen Stern vor der Tätigkeitskennungszahl) bezeichnet und die verschiedenen Reservezeiten angegeben.

Der Operativplan ist die einzige Ausgabe-Tafel, aus der der Graph wiederhergestellt werden kann. (Der Operativplan ist eigentlich ein alphanumerisches Netzwerk, erweitert durch die Ausgaben.) Bei Operativentscheidungen leistet der die *maßgebende Abhängigkeit anzeigende* Stern vor der vorangehenden Tätigkeitszahl wesentliche Hilfe. Dadurch wird es eindeutig angegeben, durch welche Beziehung und durch eine Beziehung welchen Typs die früheste Anfangslage der untersuchten Tätigkeit verursacht wurde.

In der *Tafel der vollen Reservezeit* erscheinen die Ausgaben in der Reihenfolge der wachsenden vollen Reservezeiten. An die Spitze kommen — in Anfangsfolge — die kritischen Tätigkeiten und immer weiter zurück die Tätigkeiten mit längeren Reservezeiten; damit gibt diese Tafel in gewissem Sinne die »Reihenfolge der Wichtigkeit« an.

Die *Tafel des frühesten Anfangs* ordnet die Tätigkeiten und die Ausgaben in der Reihenfolge der aufeinander folgenden frühesten Anfangszeitpunkte.

Das *Balkendiagramm* erscheint in der gewohnten bildlichen Form. Über die traditionelle Darstellung hinaus hat jedoch dieser Zeitplan einen größeren Informationsinhalt als die üblichen (manuell konstruierten) Zeitpläne, da er

>>>>> die kritische Tätigkeit bezeichnet;

----- die Reservezeiten angibt;

===== gibt daselbst in abweichender graphischer Form die nicht auf dem kritischen Weg verlaufenden Tätigkeiten in ihrer frühesten Lage an.

Der Plan kann sowohl der wachsenden Zahl der Tätigkeiten als auch den frühesten Anfangsterminen gemäß gedruckt werden.

#### 4. Anwendung, Weiterentwicklung des rechentechnischen Programms

Nach den Erfahrungen des Lehrstuhls im Unterricht und bei Aufträgen der Industrie (z. B. Investitionsprogramm für den Bau der Nord-Süd-Metrolinie in Budapest 1973—1976) läßt sich die netzwerktechnische Zeitanalyse selbst im Falle von Netzen von Tausender-Größenordnung auf dem Rechner verhältnismäßig rasch durchführen.

Die Herstellung, das Festhalten auf dem Datenträger von fehlerfreien Eingangsdaten erfordern jedoch einen beträchtlichen Arbeitsaufwand. Die gewünschte vielfältige Ausgabe nimmt in Verbindung mit der größeren Druckarbeit verhältnismäßig mehr Maschinenzeit in Anspruch.

Es versprechen auch die Rechengeschwindigkeit der EDV-Anlage auszunutzende Aufgaben zu werden:

- die (auf denselben Eingaben fußende) Reihenfolgesimulation mit verschiedenen Optimumkriterien oder
- das Verbinden des anderweitigen technisch-wirtschaftlichen Grunddatensystems (z. B. Kostenanschläge, betriebliches Normensystem) mit der Netzwerkplanung, im Interesse der höchstmöglichen gesellschaftlichen Nützlichkeit.

#### Zusammenfassung

Im Beitrag wird das Grundmodul der Software-Entwicklung für Produktionsleitung auf der Grundlage von veränderlichen Abhängigkeitsverhältnissen und minimalen oder maximalen Folgebedingungen der Netzplantechnik dargelegt.

Von einer offenen und wertmäßigen Beschreibung der Entscheidungen ausgehend werden die rechentechnischen Beschränkungen der Programmierung und die Vereinfachungsmöglichkeiten aufgezeigt.

#### Literatur

[1] HAVAS—NACY: Programmieren des Rechners ODRÁ-1204.\* Lehrstoffheft, Tankönyvkiadó Budapest, 1972.

S. a. Literaturhinweise zum vorstehenden Aufsatz.

\*In ungarischer Sprache.